

УДК 532.517:532.5.032

## Особливості вихроутворення коливними тілами

Воропаєв Г.О. д.ф.-м.н., проф., Загуменний Я.В. д.ф.-м.н., ст.д., Шквар Є.О. д.т.н., проф.  
Інститут гідромеханіки НАН України, м. Київ, Україна

*Анотація:* Роботу присвячено дослідженню процесів формування та розвитку вихрових структур на коливному тонкому симетричному профілі, а також у сліді за протяжними призматичними тілами різного перерізу, які коливаються під дією збурень нестационарних зон відриву. Детально досліджено нестационарні процеси зародження вихрових структур в області задньої кромки добре обтічного тіла (крилового профілю) при його вимушених коливаннях у стаціонарному потоці рідини. Виявлено основний параметр, при якому якісно зберігається подібність основних етапів формування вихрового сліду: виникнення інтегральної пропульсивної сили на коливному профілі; поява вихорів, що породжуються носовим відривом; прояв несиметричності вихрової структури течії. У режимах вихрово-коливального руху погано обтічного тіла близьких до резонансних проявляється сильний зворотний вплив тіла на формування відриву потоку, що, в свою чергу, призводить до зміни частоти коливань і утворення складної системи завихрень різного масштабу, частоти та енергії в сліді за обтічним тілом. Найбільша інтенсивність вихрово-коливального руху спостерігається для циліндричного тіла з поперечним перерізом у вигляді витягнутого трикутника, орієнтованого вершиною вниз за потоком.

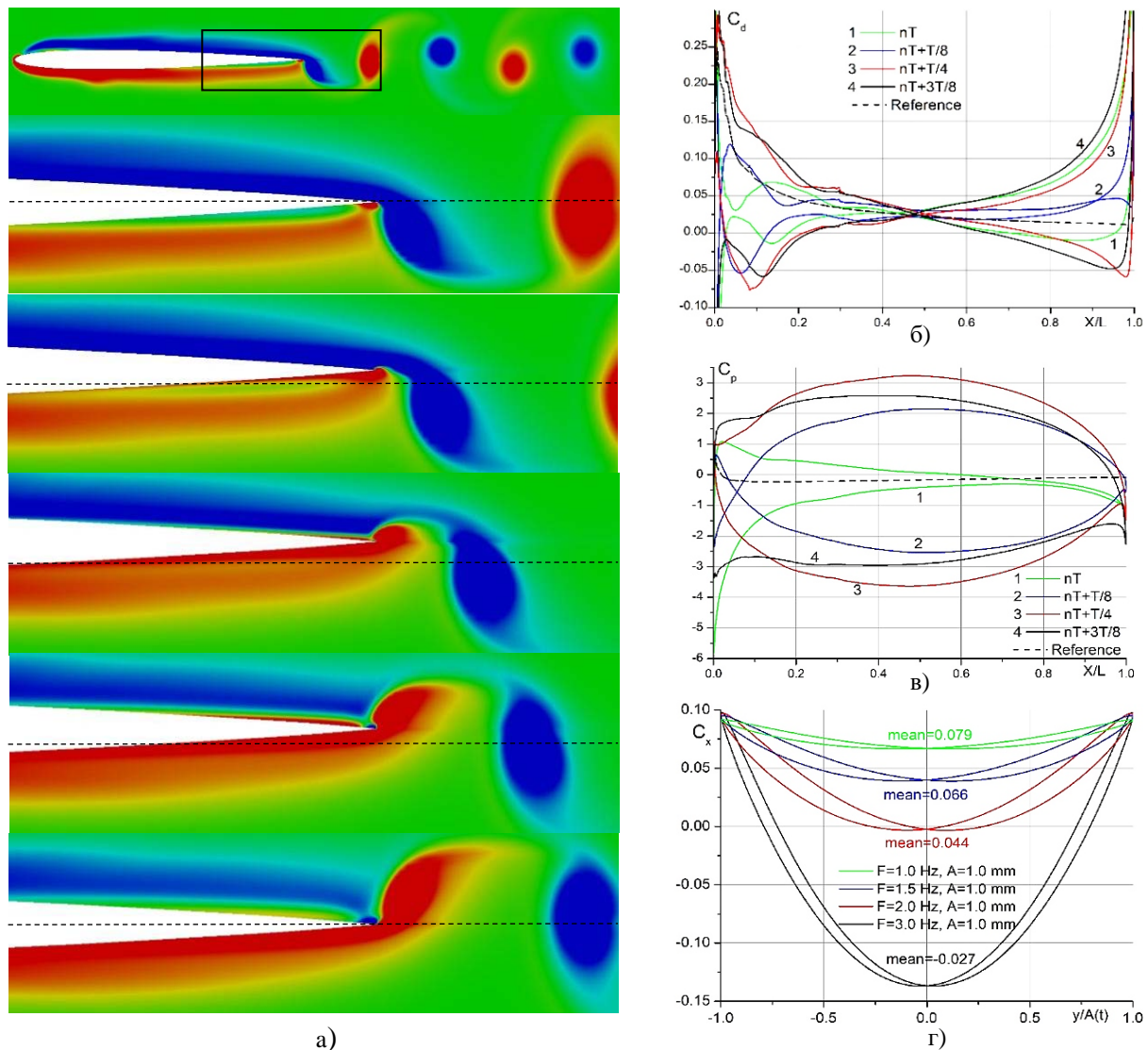
**Ключові слова:** коливні тіла; відривні течії; вихровий слід; завихреність; примежовий шар; чисельне моделювання

Закономірності вихроутворення при обтіканні різних тіл є досить добре вивченими, принаймні, початкова стадія цього процесу, пов'язана із втратою стійкості ламінарного примежового шару [1,2]. Запропоновано низку моделей, що описують стадію втрати стійкості з точки зору розвитку когерентної хвилі Толлміна-Шліхтінга, яку можна інтерпретувати як хвилю завихреності з утворенням дискретних вихорів. Проте, із збільшенням числа Рейнольдса час життя від виникнення до руйнування вихорів із масштабом довжини товщини примежового шару стає дуже коротким, що унеможливує експериментальне дослідження еволюції їхньої структури. Проте, часовий проміжок конвективного розвитку вихрової структури вже доступний для чисельного моделювання на основі розв'язку системи нестационарних рівнянь Нав'є-Стокса навіть для чисел Рейнольдса порядку  $10^4$ , що дозволяє адекватно аналізувати нестационарний вихровий слід [3–6].

У відривних течіях, особливо у випадках з фіксованою точкою відриву, масштаб вихрових структур зазвичай визначається розміром зони відриву, і частота завихреності практично не залежить від числа Рейнольдса. У випадку нестационарного руху тіл, зазвичай пов'язаного зі зміною кута атаки тіла, до визначальних параметрів такого руху, на додаток до числа Рейнольдса, необхідно віднести число Струхаля, яке визначається швидкістю зміни кута атаки.

У даній роботі наведено результати чисельного дослідження формування та розвитку вихрових структур у примежовому шарі на коливному тонкому симетричному профілі без зміни кута нахилу його хорди до напрямку потоку та в сліді за ним, а також у сліді за протяжними призматичними тілами різного перерізу, які коливаються під дією збурень нестационарних зон відриву.

Чисельне моделювання вихрових течій виконано як на основі скінченнооб'ємної апроксимації 2-го порядку методами прямого чисельного моделювання (DNS) [6], так і з використанням моделей турбулентності (RANS). Турбулентність у розглянутих докритичних режимах обтікання тіл моделювалася за допомогою низькорейнольдсової версії моделі зсувних напружень SST  $k-\omega$ , що дозволяє відтворювати поля параметрів течії з прийнятною точністю за відносно помірний час.



**Рис. 1.** Миттєві поля завихреності (а), локальні розподіли коефіцієнтів в'язкого опору (б) і тиску (в) вздовж поверхні коливного профілю в різні моменти часу в межах півперіоду коливань ( $U=0.04$  м/с,  $Re=f=2$  Гц,  $A=0.001$  м) та інтегральний коефіцієнт опору (г) як функції миттєвого вертикального переміщення профілю для різних частот коливань

Отримані чисельні результати показують, що зародження вихрового сліду при вимушених коливаннях профілю відбувається безпосередньо на його задній кромці зі збереженням знаку завихреності, що сформувалася у примежовому шарі на відповідній стороні коливного профілю. Далі протягом чверті періоду відбувається його формування зі збільшенням масштабів та інтенсивності. За наступну чверть періоду сформована на поверхні профілю завихреність сходиться із задньої кромки у вигляді компактних вихорів, які у сукупності формують вихровий слід за обтічним тілом (Рис.1, а). Миттєві значення опору тертя змінюють знак на поверхні коливного профілю, при цьому відбувається зміщення положень нульових значень на поверхні при його коливальному русі, що говорить про появу нефіксованих точок відриву внаслідок взаємодії вимушених коливань профілю із власними збуреннями хвилі завихреності в примежовому шарі (Рис.1, б). У носовій частині коливного профілю при проходженні ним нейтрального положення з'являється інтенсивна зона пониженого тиску, що пояснює виникнення сили тяги на коливному профілі (Рис.1, в). Залежність інтегральної сили опору профілю від миттєвої амплітуди коливань показують, що

мінімальні значення опору досягаються при проходженні нейтрального положення, а максимальні значення, що відповідають величині опору профілю при стаціонарному обтіканні, – при його екстремальних положеннях (Рис.1, г). Число Струхала, що визначається відношенням швидкості зміщення профілю до швидкості потоку і характеризує швидкість зміни кута атаки:  $St=A \cdot f/U$ , є параметром подібності, при якому якісно зберігається подібність формування вихрового сліду. Так, умова  $St>0.05$  визначає виникнення інтегральної пропульсивної сили на коливному профілі, при  $St>0.1$  проявляються вихори, що породжуються носовим відривом і взаємодіють з власними обуреннями хвилі завихреності, а при  $St>0.15$  проявляється несиметричність вихрової структури течії. При цьому виникаюча несиметричність вихрової течії істотно залежить від початкових умов старту коливань профілю, що демонструє інерційність процесів вихроутворення.

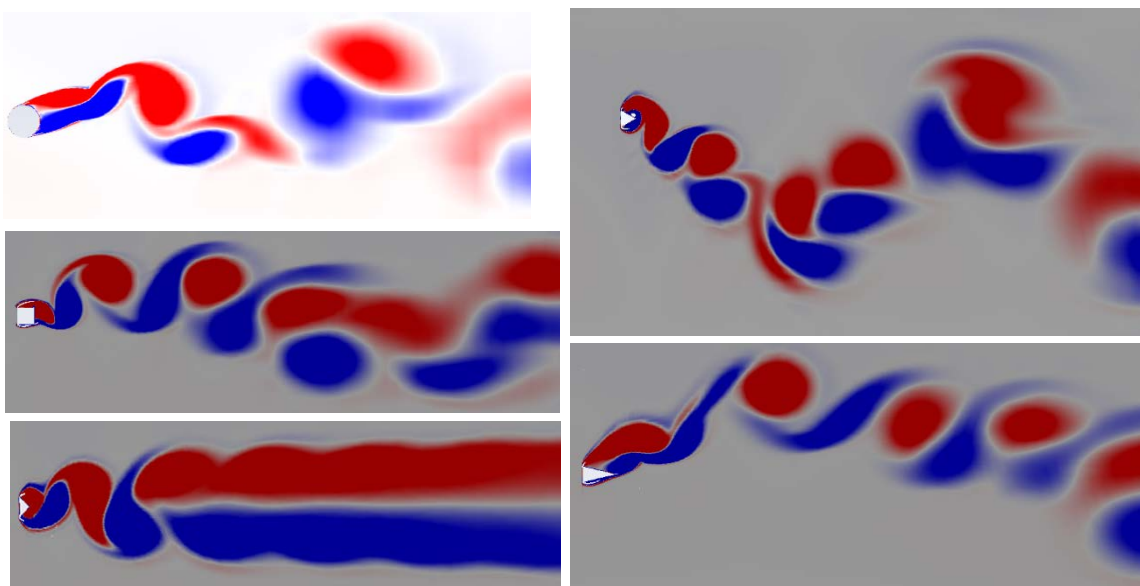
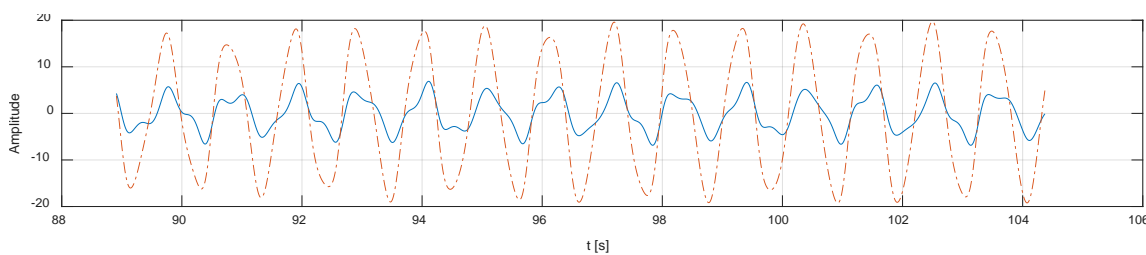
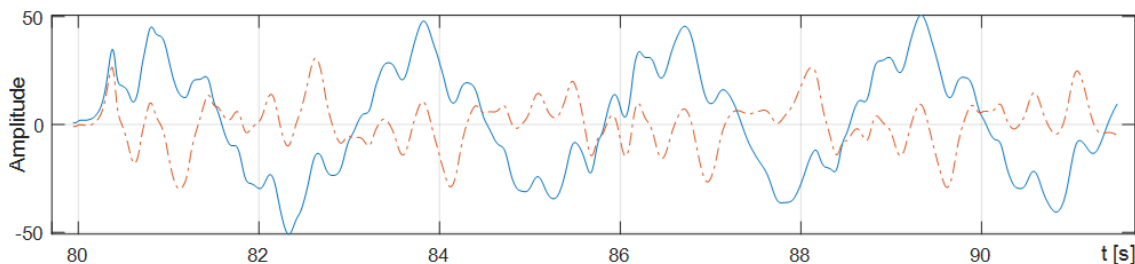


Рис. 2. Структура вихрового сліду за коливними призматичними тілами різного перетину:  $U_{\infty}=1$  м/с,  $Re=60000$ , середовище – вода



а)



б)

Рис. 3. Залежність від часу гідродинамічних (суцільна синя лінія) і зовнішніх (пунктирна оранжева лінія) сил (у Ньютонах), що діють на витягнуті круглий (а) і трикутний (б) циліндри:  $U_{\infty}=1$  м/с,  $Re=60000$

Друга частина роботи присвячена дослідженню вихрово-коливального руху, що є результатом силової взаємодії відривної нестационарної течії з пружно закріпленими обтічними тілами, в якості яких розглядалися циліндри круглого, квадратного та трикутного поперечного перерізу. Одним із найцікавіших аспектів такого дослідження є структурні особливості формування вихрового сліду за такими тілами, а у випадку вихрово-коливального руху – параметри коливань тіла. Вимушений рух тіла описується типовим звичайним диференціальним рівнянням 2-го порядку для переміщення тіла  $h$ , що включає масу коливальної системи, коефіцієнти жорсткості та демпфування як параметри та гідродинамічну силу взаємодії потоку з тілом в якості правої частини. Крім того, було враховано взаємодію потік-тіло за допомогою модифікованих граничних умов стінки.

Деякі характерні вихрові структури в сліді для трьох циліндричних тіл різної форми з пружним закріпленням наведено на Рис.2. Усі розглянуті випадки відповідають значенням жорсткості  $k=199$  Н/м і коефіцієнту демпфування  $c=3.9$  Н·с/м відповідно до умов експерименту [7]:  $U_\infty=1$  м/с,  $\rho=998.2$  кг/м<sup>3</sup>,  $\nu=10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с – вода ( $Re=60000$ ). На приведених полях завихреності добре прослідковується спотворення строго періодичної структури типової вихрової доріжки Кармана за нерухомими погано обтічними тілами. Тобто відбувається сильний зворотний вплив тіла, здійснюючого вихрово-коливальний рух, на формування відриву потоку, що призводить, серед іншого, до зміни частоти коливань і утворення складної системи завихрень різного масштабу, частоти та енергії у сліді за обтічним тілом. Залежності від часу гідродинамічних і зовнішніх сил, що діють на тіла різної форми (Рис.3), показують, що найбільша інтенсивність процесу вихрово-коливального руху виявляється для циліндричного тіла з поперечним перерізом у вигляді витягнутого трикутника з вершиною, орієнтованою вниз за потоком.

Таким чином, отримані результати чисельного дослідження показали, наряду з наявністю принципово спільних властивостей, існування ряду суттєвих відмінностей між утворенням вихрового сліду за добре обтічним профілем, що здійснює вимушені коливальні рухи, та погано обтічним тілом на пружній насадці, що коливається під дією вихроутворення. Такі комплексні дослідження для принципово різних форм тіл і типів джерела збурення дають змогу краще пояснити та описати механізм формування нестационарного динамічного навантаження в залежності від умов експлуатації.

#### Список літератури

1. *Betchov R., Criminale W.* Stability of Parallel Flows. Academic Press, 1967, 330 pp.
2. *Boiko A., Grek G., Dovgal A., Kozlov V.* The Origin of Turbulence in Near-Wall Flows. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New-York, 2002, 270 pp.
3. *Chang J., Zhang Q., He L., Zhou Yi.* Shedding Vortex Characteristics Analysis of NACA 0012 Airfoil at Low Reynolds Numbers. Energy Reports. 2022, V. 8, S. 4. P. 156-174.
4. *Kurtulus D.F.* Vortex Flow Aerodynamics behind a Symmetric Airfoil at Low Angles of Attack and Reynolds Numbers. International Journal of Micro Air Vehicles. 2021, 13.
5. *Voropaev G.A., Zagumennyi Ia. V.* Boundary Layer Perturbations Generated by Locally Deformable Surface. Int. J. of Fluid Mechanics Research. 2019, V. 46, N 4. P. 325–335.
6. *Воропаєв Г.О., Загумений Я.В.* Чисельне моделювання обтікання нестационарно рухомих тіл. Комп. математика. 2018. N 2. С. 13–20
7. *Lian J., Yan X., Liu F., Zhang J.* Analysis on Flow Induced Motion of Cylinders with Different Cross Sections and the Potential Capacity of Energy Transference from the Flow. Hindawi. Shock and Vibration. 2017, V.2017. Article ID 4356367.